



高铁低硅烧结技术发展动态

支建明¹, 李杰¹, 李飞², 李大亮², 杨爱民¹

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063210; 2. 山西建龙实业有限公司, 山西 运城 043801)

摘要:近年来,随着我国高炉炼铁技术的不断进步,对入炉矿品位的要求也不断提高。目前高铁低硅烧结技术的研究已经成为烧结技术发展的一大进步。应用高铁低硅烧结可进一步提高入炉品位,达到提铁、降硅、节焦及降低生铁成本的目的。此技术也对改善高炉冶炼条件和相应的技术经济指标具有非常重要的意义,并且响应国家号召,实现炼铁工艺的节能降耗。然而随着烧结矿中铁品位的提高, SiO_2 含量的降低,特别是当 SiO_2 含量低于5%时,烧结过程中液相量的减少,粘结相的不足等问题势必会影响烧结矿的强度和产、质量。所以解决这些问题,成为高铁低硅烧结技术能够持续创新发展的不竭动力。本文主要是对高铁低硅烧结技术在国内外的发展现状所做的一个归纳总结,以及根据生产实际出现的问题提出相应的解决措施,同时对该技术未来发展趋于智能化所做出的一些设想。

关键词: 高铁低硅; 烧结矿; 节能降耗; 智能化

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.01.015

中图分类号: TD951; TF044 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2022)01-0121-08

国家“十二五”规划纲要中提出,要“大幅度降低能源消耗的强度和提高能源利用效率,加快低耗技术研发和应用^[1]。”这就从国家规范的层面上说明我国对节能降耗的重视程度,对节能降耗工作逐渐重视起来。21世纪钢铁行业面临着严峻的市场竞争考验,企业要实现创新可持续发展,必须进一步节能降耗,并且大力推广高炉精料技术,实施高铁低硅烧结则是实现这一目标的关键举措。通常,烧结矿中 SiO_2 每降低1%,焦比会降低2%,进而生产效率提高3%^[2]。但一般认为烧结矿中 SiO_2 的含量只要低于5%时,就会引起烧结矿产能下降以及烧结矿冷态强度变差,成品率降低,低温还原粉化指标变差等一系列问题。因此,关于高铁低硅烧结技术的研究和发展,是当今世界钢铁企业的关注重点。以下内容旨在介绍目前国内外炼铁行业中的高铁低硅烧结技术及其发展现状和创新情况进行详细阐述,为相关研究

学者提供思想和理论层面的帮助。

1 高铁低硅烧结技术的研究动态

20世纪80年代国外钢铁行业把注意力主要集中在提铁降硅的研究中,在全世界范围内,日本很早就开始研究低硅烧结了,早在90年代就将 SiO_2 的含量降到4.5%左右^[3]。而欧洲的一些先进的烧结厂也已经将 SiO_2 的含量降低到4.4%~4.8%的水平。而我国各钢铁厂直到进入21世纪以来才重视对高铁低硅烧结技术,其中像莱钢、济钢、唐钢等钢铁厂烧结矿的 SiO_2 可以达到4.0%~4.5%的水平。铁的品位也可以达到59%左右。

1.1 国内高铁低硅烧结技术的应用现状

徐钢一直是以冶炼铸造生铁为主要产品的企业,自2001年3月开始实施小球团烧结工艺改造之后,大大提高了入炉料的品位,实现了高铁低硅烧结矿的生产。相比于2001年以前将TFe从

收稿日期: 2020-04-01; 改回日期: 2020-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(51674121); 河北省优秀青年科学基金项目(E2018209248)

作者简介: 支建明(1996-),男,硕士生。

通信作者: 杨爱民(1978-),男,教授,博士生导师, E-mail: aimin@ncst.edu.cn。

54.54% 提高到 60.35%， SiO_2 含量于 6.36% 降低到 4.9%^[4]，为其烧结机的稳产顺产提供有力条件。

太钢 2002 年投资对自产精矿进行降硅处理，实现了烧结原料从高硅（ $\text{SiO}_2=7\%$ ）向低硅（ $\text{SiO}_2=5\%$ 以下）的转化。为了改进措施，提高高铁低硅烧结矿性能，分别采用了不同碱度、 MgO 含量、燃料配比、原料结构以及料层厚度的方法进行了实验室烧结杯实验，发现当烧结矿 SiO_2 含量降到 4.5% 以下时，出现烧结矿粉率大增，冶金性能指标不稳定，高炉炉况不顺等问题。为此要想保证烧结矿的强度， $\omega(\text{SiO}_2)$ 应大于 4.5%^[5]。新型铸管公司^[6-7]采用同样的措施，从 2003 年开始到 2010 年七年间，将 SiO_2 含量从 5.43% 降低到了 4.3%~4.0% 的水平。

湘钢^[8]在 2017 年入炉料烧结矿的使用在 78% 以上，所以更加重视烧结矿的品位。其使用的铁矿石 80%~90% 为赤铁矿，碱度稳定在 1.9~2.0，生成铁酸钙的能力强。且烧结矿液相量越多，降低 SiO_2 的含量、提高铁品位的能力就越强。结果将 SiO_2 的含量从 5.30% 降到 4.81%， TFe 从 56.21% 提高到 57.50%。生产过程中存在料层厚度提高后透气不好、烧结料层的漏风率太大、上料系统运行不稳定等问题。

2019 年阳春新钢合理搭配高铁低硅、中铁高铁铁矿石开展高铁低硅实验，将烧结矿 SiO_2 的含量降低至 4.5%~4.8%，与其他钢铁厂不同的是阳春新钢铁在实施高铁低硅烧结时，烧结混合料中配入 25%~30% 的高镁磁铁精粉，用以保证透气性，改善烧结矿 RDI ，并保持较好的烧结产、质量指标^[9]。

1.2 国外高铁低硅烧结技术的发展现状

日本户畑烧结厂是全世界最早进行低硅烧结实验的企业，1980 年的生产条件下就已经将 SiO_2 的含量降到了 5.55%，有效提高烧结矿质量^[10]。日本川崎钢铁公司采用了厚料层、低硅操作，使烧结矿的成品率提高，固体燃耗降低，并降低烧结成本，所以其又向着高产低成本的方向发展^[11]。新日本钢铁公司君津厂在 80 年代进行降低烧结矿 SiO_2 含量的实验， SiO_2 含量从 5.84% 降到 5.21%，并且还还原性和还原粉化率得到改善^[12]。

日本的 P.R.Dawson 在八十年代中期提出了一种在当时来说比较新的低硅烧结工艺，采用的主要方法是低温烧结，使加入的焦炭减少；提高了

炉料的软熔温度，改善炉渣的流动性和脱硅能力，通过配加蛇纹石提高了烧结矿中镁的含量，提高了烧结矿的冶金性能^[13]。日本君津厂也采用了配加细粒蛇纹石的方法，取得了比较好的效果^[14]。K.Fujii^[15]等人在烧结杯实验中采用厚料层操作，得知在厚料层烧结的条件下，降低燃料比的同时还可以稳定生产低 FeO 含量、低 SiO_2 含量的烧结矿，并且对 RDI 几乎没影响。

芬兰科维哈厂在烧结生产实践中，铁的品位已经达到了 60%~61%。随后以含磁铁精粉为主要原料进行 TFe 为 62.0%~65% 的烧结矿实验，同时，他们还通过添加生石灰和增加焦粉用量以改善烧结矿强度。其他指标见表 1^[16]。

表 1 科维哈厂试生产烧结矿指标
Table 1 The sinter ore index of the trial production of the Keweiha plant

$\text{TFe}/\%$	$\text{FeO}/\%$	$\text{CaO}/\%$	$\text{SiO}_2/\%$	$\text{MgO}/\%$	$\text{Al}_2\text{O}_3/\%$	碱度/倍
61.2	10.3	6.50	4.62	1.61	0.48	1.41
63.8	12.8	5.04	3.79	1.32	0.38	1.58
64.2	13.4	4.85	2.94	1.12	0.40	1.65
64.8	13.5	4.29	2.63	1.05	0.42	1.63

从表 1 中的数据可以看出，采用含铁比较高的磁铁精粉，烧结矿的 TFe 和 SiO_2 含量指标接近理论值，结合目前国内外生产实际，此数据仅能停留在实验阶段，无法推广到企业生产。

综上所述，国外烧结矿入炉品位高达 60% 左右， SiO_2 含量基本上可以降到 4.4% 以下。我国只有少数企业在影响其他烧结指标的情况下，才能基本与国外相持平。国外高铁低硅烧结所采取的措施是：低温低碳烧结、提高料层厚度、添加细粒蛇纹石、以含高铁低硅精矿粉为原料的烧结工艺等。而国内主要以低温烧结、高碱度烧结、厚料层烧结、改进原料结构等措施为主。可以看出，我国各钢铁企业在逐步发展高铁低硅烧结技术，大部分企业在使用国外的先进技术，许多技术细节还有待完善。

1.3 实现高铁低硅烧结所面临的困难

研究表明^[17-18]，我国铁矿石进口量从 2001 年的 7000 万 t 增加到 2017 年的 10.75 亿 t。如此庞大的数字背后暗藏着我国矿产资源短缺的现状。另一方面高铁低硅烧结与常规烧结相比，在选矿配矿、矿物结构、物化性质以及工艺条件方面都存在较大差异，同时也提出了更高的要求。高铁

低硅烧结面临的主要技术难题是解决由于铁高、硅低、渣量少所带来的强度显著下降的问题。解决这些问题的关键是如何提高铁酸钙的生成量，抑制钙铁橄榄石的生成，最终用复合铁酸钙（SFCA）和铁氧化物再结晶固结形成烧结矿^[19]，这是改善高铁低硅烧结矿质量的根本途径。

2 高铁低硅烧结矿性能优化的措施

2.1 碱度优选技术

通过理论研究和多年来的生产实践表明，高碱度是保证烧结矿质量的基础。对目前高炉炼铁而言，高铁低硅烧结矿最佳的碱度范围是 1.90~2.40。而烧结矿的强度和冶金性能均与其碱度直接相关，高碱度是生产趋势。

1) 提高强度

高铁低硅烧结主要的技术难题是由于硅含量少，所以出现烧结过程液相量少、渣量不足等影响烧结矿强度的问题。在国外主要是采用提高烧结矿碱度和生产复合优化的烧结矿的方法来增加烧结矿中的铁酸钙（CF）含量，达到提高烧结矿强度的目的。而发展以 SFCA 为主要粘结相的烧结矿是进一步改善烧结矿质量的根本途径^[20]。高铁低硅烧结成矿机理包含固相反应、液相反应、冷凝结晶三个过程，与烧结矿的矿物组成、结构和对烧结矿的质量有密切关系，所以烧结矿的强度主要是靠液相固结来保证的^[21]。

在降低 SiO₂ 含量致使粘结相总量减少的条件下，只有通过提高二元碱度以增加烧结矿中 CaO 含量，为生成还原性和强度较好的铁酸钙创造物质条件。高碱度烧结矿以铁酸钙为主要粘结相，玻璃质相很少，且矿物组成中铁酸钙和玻璃相均为粘结相，铁酸钙的抗压强度为 363 N/cm²，玻璃相仅为 45 N/cm²。所以这些特点决定了高碱度烧结矿具有较高的常温强度和较好的还原性。但由于各厂原料条件和高炉炉况要求不同，还需

结合实际情况综合考虑。

何木光等^[22]在钒钛磁铁矿高碱度下提铁降硅的实验中，分别设定碱度为 2.45、2.55、2.65、2.75，采用调整生石灰的配比来改变碱度，保持 SiO₂ 含量在 4.7% 左右，TFe 在碱度为 2.45 时达到最高 50.25%。贺淑珍等^[23]通过对太钢高铁低硅烧结技术的研究，分析碱度对烧结矿的影响，规定碱度为 1.7~2.0，随着碱度的升高烧结利用系数呈上升趋势，烧结转鼓强度、成品率亦然。返矿含量呈下降趋势，<10 mm 粒级的烧结矿含量也随碱度的升高而降低。

冯向鹏等^[24]为了研究碱度对低硅烧结矿产、质量的影响，且确定 SiO₂ 含量为 4.0% 时碱度的适宜值，采用宣钢的原料，模拟现场进行实验室烧结杯抽风烧结实验。结果表明：烧结矿的转鼓强度呈先升后降的趋势，降低的原因是碱度提高到一定程度时，过多的 CaO 与铁酸一钙反应生成强度较差的铁酸二钙，从而导致烧结矿强度降低。

2) 改善低温还原粉化性能

针对高铁低硅烧结矿强度低、低温还原粉化差的特点，伍成波等人^[25]对某钢铁厂的矿相进行了分析，发现其磁铁矿和铁酸钙含量较少，而强度极差的硅酸盐玻璃质和还原性较好的赤铁矿含量较高。为了改善其低温还原粉化性能，特研究烧结工艺和烧结矿成分对碱度的影响。其中在保证燃料配比和 Al₂O₃/SiO₂ 分别为 5.0% 和 0.31 时，考察碱度从 2.1~2.4 变化时对烧结矿低温还原粉化性能和矿相的影响。实验结果见表 2。

结果表明：随着烧结矿碱度提高，其矿物组成发生显著的改变，赤铁矿在矿相中的占比减少；铁酸钙占比先增后减，在碱度为 2.3 时达到最大，烧结矿 RDI_{+3.15} 达到最佳。说明碱度的提高确实有利于提高高铁低硅烧结矿的强度^[26]。

表 2 碱度对实验结果的影响

Table 2 Effect of alkalinity on test results

试样号	低温还原粉化/%			矿物组成（面积分数）/%				
	RDI _{+6.3}	RDI _{+3.15}	RDI _{0.5}	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	铁酸钙	硅酸盐	孔洞
R ₂ -2.1	15.78	50.37	6.94	1.43	53.52	33.84	10.45	0.49
R ₂ -2.2	8.23	58.56	8.52	3.17	49.85	36.28	10.85	1.20
R ₂ -2.3	24.61	67.80	5.65	0.78	40.75	46.42	10.18	1.81
R ₂ -2.4	10.00	49.70	8.71	0.40	50.80	36.89	10.79	0.83

Higuchi^[27] 等人在 2006 年, 通过高铁低硅烧结实验发现在 1.5~2.0 范围内改变碱度, 烧结矿中不单铁的品位有所增加, 并且烧结矿的高温还原性有所改善。Fan^[28] 等人还进行非常规实验, 将碱度从 0.6 增加到 2.2 时, 烧结矿的还原性从 44.45% 提高到 74.36%, 效果非常明显, 不过此方法还是停留在实验阶段。实际生产中因无法保证其他烧结指标达到最优, 所以理论上此法是可行的。

烧结矿的碱度稳定是提高烧结矿产、质量的关键因素。碱度不同烧结矿的矿物组成不同, 其强度和质量就不同。一般来说, 在碱度增高的情况下, 一方面自熔性烧结矿强度变好, 还原性变好, 低温还原粉化率升高; 另一方面对高炉提高产量、降低焦比和实现高炉顺行有实质性的帮助。所以未来高炉冶炼总的趋势是大力发展高碱度烧结矿, 可以尝试在选用高碱度原料和高炉运行当中添加溶剂的方式来达到提高碱度的目的。

2.2 烧结料层影响机制

厚料层烧结具有良好的蓄热作用, 在烧结过程中, 随着燃烧带下移, 由于上层烧结矿具有“自动蓄热”作用^[29], 温度逐渐升高, 料层的蓄热量随着料层高度的增加逐渐积累, 料层温度的最高值也在提高。而且由于料层提高后, 垂直烧结速度减慢, 高温保持时间延长, 液相结晶发育完善, 烧结内层氧化气氛增强, 使高价铁氧化物的分解减少, 从而有利于强度好、还原性好的针状铁酸钙生成, 有利于液相的形成^[30]。

兴澄特钢^[31] 采用柳钢厚料层烧结技术(连续二次低温炉和全屏阻流器), 并在此基础上取消热筛和一次冷筛, 铺底料粒级为 6~11 mm, 将原 52 m² 烧结机面积扩展至 60 m², 料层厚度由 600 mm 提高至 750 mm(预留 800 mm 的空间)。保证高温固结时间, 固液相反应充分, 矿物结晶完善, 达到改善烧结矿内部结构和提高其质量的目的。张克诚等^[32] 也在进行烧结杯基准实验时, 料层厚度为 750 mm 来开展厚料层烧结。相较于 600 mm 的料层厚度, 产量提高 13.7%, 转鼓强度提高 2.26%。

首钢京唐^[33] 通过对烧结料层透气性进行理论分析, 开展了改善混合料堆积效果、优化烧结布料时混合料粒度分布的横向偏析和纵向偏析等技术, 将首钢京唐公司 550 m² 烧结机的料层厚度提高到 910 mm 以上。结果烧结矿中铁酸钙质量分数

提高了 3.67%、返矿率降低了 2.36%、固体燃料消耗降低了 1.93 kg/t·s。而湘钢^[34] 采用通过点火炉抬高、雾化水制粒系统及防堵型微负压点火自动控制装置的开发与应用、烧结机台车整体改造、布料方式的优化改造和炉条板结的治理等技术措施, 将转鼓强度提高至 80.15%, 固体燃料消耗降低了 5.95 kg/t·s, 大幅度降低生产成本, 节能降耗效果显著。

就目前生产实践而言^[35], 实施高料层烧结已经在烧结矿的产、质量上面得到了证实。基本实现了高效率生产, 所面临的问题不仅是如何提高高铁低硅的性能指标, 而是在继续坚持厚料层烧结的态势下, 必须将节能降耗工作作为一项重点攻关内容。综合我国能源消耗现状, 实施厚料层烧结将导致能源的大量消耗, 因此节能降耗势在必行。同时这也是钢铁企业实现高质量、快速发展的必然趋势。

2.3 烧结配矿优化技术

配矿效果的好坏直接影响到混合矿的化学成分及稳定性, 尤其对提铁降硅、烧结矿成本和高炉冶炼过程直接相关。随着高炉的大型化, 高炉炼铁对烧结矿的要求越来越高, 而参与配矿的铁矿石种类繁多、品种杂、质量不稳定等因素, 对配矿的定性指标影响尤为重要。配矿方案直接影响到烧结矿的质量和冶金性能^[36], 配矿研究主要集中在优化烧结配矿、优化配矿数学模型、优化铁矿石性能配矿^[37]。

1) 优化烧结配矿实验

烧结配矿实验是根据混合矿的化学成分, 结合各企业铁矿的供应情况, 计算并设计出配矿方案后再进行烧结杯实验, 随后根据实验结果, 分析对烧结矿性能指标的影响, 再对配矿方案进行调整。

攀钢^[38] 为进一步提高高铁低硅烧结矿质量, 在现有资源条件下, 通过优化配矿提高印度矿的配比实现高铁低硅烧结, 使烧结矿全铁质量分数从 49.20% 提高到 51.46%, SiO₂ 含量从 5.30% 降低至 4.05%。

济钢^[39] 为了全面研究国内进口矿高铁低硅的配矿技术, 结合烧结主要的冶金性能和经济指标, 确定烧结配矿方案: 澳洲粗粉选择纽曼粗粉, 巴西粗粉选择卡拉加斯和富铁库粗粉较好, 铁精粉选择西石门和国内杂精粉两种。该配矿方

案最终 TFe 达到 59% 左右, SiO_2 含量可以保持在 4.4% 左右。考虑到经济成本, 可以适当配加杨迪粗粉和印度粗粉, 降低原料费用。

传统的烧结配矿实验, 对于每种新的矿粉或者新的配矿方案, 要进行新的实验去验证。这就对人力、物力资源造成极大的消耗, 还不能对结果进行预判, 导致结果不具备通用性和推广价值。并且在生产实践中主要以单一矿种替代为主, 缺乏对各种铁矿粉原料性能的认识。

2) 优化配矿数学模型

张大好^[40] 基于某厂的烧结生产数据以及铁矿粉之间的高温、常温性能, 建立了铁矿粉综合烧结配矿数学模型。此模型主要是利用线性规划法、遗传算法等计算方法, 输出以烧结成本明显降低外, TFe 微小改变、 SiO_2 含量高达 8.0% 左右的数据。同样潘开灵^[41] 将分布配比优化模型与集成配比优化模型应用于高炉炼铁, 在出矿时主要计算烧结矿成本, 对烧结矿质量研究相对较少。

现行的优化配矿模型多数是以降低原料成本为最终目标, 从而对原料的化学成分和用矿量进行优化, 这一过程所遗漏的是矿粉之间本身的性能、制粒性能、粒度组成对烧结矿的产、质量指标的影响。同时为了得到对成本的优化, 配矿模型存在一定的盲目性。

3) 优化铁矿石性能配矿实验

铁矿石高温性能是指在高温状态下其所表现出来的物化性能, 它直接影响铁矿石的烧结性能。为了改善烧结矿产质量, 石凤丽^[42] 使用微型烧结装置。根据蒙古矿铁品位低, 硅含量高不能单一矿种使用的特点, 进行了与包钢常用矿的混合配矿优化实验, 研究其烧结基础特性, 合理配矿后改善了铁低硅高的特性。验证了基于铁矿粉高温特性的烧结优化配矿方法是科学可行性的, 为改善烧结矿产质量及冶金性能提供了技术支撑。包钢^[43] 采用微型烧结法对不同种类铁矿粉的烧结基础特性进行研究, 为日后更好的生产提供基础数据。

基于铁矿石高温性能的配矿实验, 其优点是结合不同铁矿石之间的性能差异采用互补原理进行优化配矿, 这样可以对烧结配矿起到很好的指导作用。但是存在的问题是这种互补性原理没有很明确的判断依据, 单一矿种的性能叠加是否与混合矿的性能一致, 还有待研究。由于没有准确

的定性指标, 当矿石种类增多时, 配矿方案将会非常复杂, 这样得出的结果很难判断其优劣性。

烧结配矿是一项连通性很强的系统工程, 烧结优化配矿的深入研究还有很长的路要走, 优化配矿、高铁低硅烧结、合理炉料结构这三个方面是相辅相成的, 每一个指标都能影响炼铁的技术指标, 所以应从以下几方面深入的研究^[44]。

(1) 对各种铁矿石之间, 铁矿石与溶剂之间的反应机理深入研究, 对含铁原料的冷态性能和热态性能进行深入分析, 全面掌握铁矿石影响烧结质量指标的性能评价, 建立铁矿石冷态性能、热态性能和冶金性能之间的相互联系, 准确得出原料性能和烧结指标之间的关系, 揭示在高铁低硅条件下如何增加粘结相量, 并且在有限粘结相量条件下如何提高烧结矿强度为优化配矿扎实基础。

(2) 为了顺应时代发展需求, 钢铁行业也要从自动化走向智能化, 早日实现炼铁的智能化。同时也要考虑技术指标和经济指标之间的综合评价, 相信将高铁低硅技术与智能化结合一定能使其得到很大程度的突破, 进而支撑整个炼铁行业的科技发展。

3 展望和发展趋势

(1) 继续深入研究高碱度、高料层的烧结工艺, 提高烧结矿产、质量的同时降低固耗, 当然也不是越高越好, 要与各厂的实际相结合;

(2) 针对现有的铁矿粉, 继续烧结杯、微型烧结实验, 完善对单一矿粉以及混合矿粉高温性能研究不充分的地方;

(3) 原料繁多、成分复杂和成本升高等问题致使高铁低硅烧结技术在配矿优化方面要作为重点来抓, 不光要实现配好, 还要能够简化配矿方式, 这就要求在实施配矿模块化的同时走向智能化。从原料到烧结再到高炉如果都能实现智能化, 那将对炼铁行业具有划时代的意义。

参考文献:

- [1] 张俊杰. 炼铁工业节能减排技术[J]. 科技传播, 2013(5):112-114.
- ZHANG J J. Energy Saving and Emission Reduction Technology of Ironmaking Industry[J]. Science and Technology Communication, 2013(5):112-114.

- [2] 应自伟, 姜茂发, 许力贤, 等. 积极开发低硅烧结技术[J]. 烧结球团, 2002(06):8-11.
- YING Z W, JIANG M F, XU L X, et al. Active development of low silicon sintering technology[J]. Sintering Pellets, 2002(06):8-11.
- [3] 臧疆文, 王梅菊, 柯建新, 等. 小球团低硅烧结技术研究[J]. 新疆钢铁, 2006(4):4-6+10.
- ZANG J W, WANG M J, KE E J X, et al. Study on sintering technology of small pellets with low silicon[J]. Xinjiang Iron and Steel, 2006(4):4-6+10.
- [4] 许玉祥, 于原浩, 苏舜宇, 等. 徐钢高铁低硅烧结矿的生产[J]. 烧结球团, 2001, 26(6):41-42.
- XU Y X, YU Y H, SU S Y, et al. Production of low silicon sinter for high speed iron in Xugang[J]. Sintering Pellets, 2001, 26(6):41-42.
- [5] 贺淑珍, 边建刚, 李铁, 等. 太钢实施高铁低硅烧结初步探讨[J]. 钢铁研究, 2003, 31(6):11-14+54.
- HE S Z, BIAN J G, LI T, et al. Preliminary discussion on the implementation of high speed iron and low silicon sintering in TISCO[J]. Iron and Steel Research, 2003, 31(6):11-14+54.
- [6] 史国宪. 新兴铸管公司低硅烧结生产实践[J]. 烧结球团, 2005, 30(4):43-47.
- SHI G X. Production practice of low silicon sintering in Xinxing casting pipe company[J]. Sintering Pellets, 2005, 30(4):43-47.
- [7] 宋延琦, 李京社, 唐海燕, 等. 新兴铸管公司高铁低硅烧结实践[J]. 烧结球团, 2010, 35(1):48-52.
- SONG Y Q, LI J S, TANG H Y, et al. Sintering practice of high iron and low silicon in Xinxing casting pipe Company[J]. Sinter Pellets, 2010, 35(1):48-52.
- [8] 罗文平, 赵改革. 湘钢高铁低硅烧结技术的生产实践[J]. 烧结球团, 2017, 42(6):39-42+62.
- LUO W P, ZHAO G G. Production practice of low silicon sintering technology for high speed iron at Xianggang[J]. Sintering Pellets, 2017, 42(6):39-42+62.
- [9] 郑呈祥. 阳春新钢铁高铁低硅烧结的生产实践[J]. 南方金属, 2019(5): 23-25+46.
- ZHENG C X. Production practice of Yangchun new iron and steel high-speed iron and low silicon sintering [J]. Nanfang Metals, 2019(5):23-25+46.
- [10] Ishikawa Y, Sasaki S, Hagi Y, et al. production of low FeO and low SiO₂ sinter at Tobata no. 3 sinter plant, nippon-steel-corp-(improvement of sinter reducibility. 1[C]//transactions of the iron and steel institute of japan. 9-4 otemachi 1-chome chiyoda-ku, tokyo 100, japan: iron steel inst japan keidanren kaikan, 1982, 22(4): b83-b83.
- [11] Obata H, Takahashi H, Nakamura M, et al. high productivity operation at chiba no. 4 sinter plant[J]. isij international, 1991, 31(5): 478-486.
- [12] Kase M, Umezū Y, Tanaka N, et al. test operation results of sinter production with low slag content and high reducibility[C]//transactions of the iron and steel institute of japan. 9-4 otemachi 1-chome chiyoda-ku, tokyo 100, japan: iron steel inst japan keidanren kaikan, 1982, 22(2): b4-b4.
- [13] 唐贤容, 张清岑. 烧结理论与工艺 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社. 1992.
- TANG X R, ZHANG Q C. Sintering theory and technology [M]. Changsha: Central South University of Technology Press. 1992.
- [14] Kase M, Umezū Y, Tanaka N, et al. test operation results of sinter production with low slag content and high reducibility[C]//transactions of the iron and steel institute of japan. 9-4 otemachi 1-chome chiyoda-ku, tokyo 100, japan: iron steel inst japan keidanren kaikan, 1982, 22(2): b4-b4.
- [15] Fujii K, Hazama K, Hoshikuma Y, et al. Reduction of FeO contents in sinter under high bed operation[R]. Iron and Steel Society, Warrendale, PA (United States), 1996.
- [16] Raipala K. High Iron Sintering at Koverhar[C]//Ironmaking Conference Proceedings, . 1992, 51: 61-66.
- [17] Kurunov I F. Current State of Blast-Furnace Smelting in China, Japan, South Korea, Western Europe, and North and South America[J]. Metallurgist, 2015, 59(7-8):562-577.
- [18] 辜海芳. 近年我国进口铁矿石现状分析及 2018 年展望[J]. 冶金经济与管理, 2018(1):54-56.
- GU H F. Analysis on the Status quo of imported iron ore in China in recent years and outlook for 2018[J]. Metallurgical Economics and Management, 2018(1):54-56.
- [19] Jeon J W, Kim S W, Jung S M. Utilization of magnetite concentrate as an additive in adhering fines of quasi-particle and its effect on assimilation behavior[J]. ISIJ International, 2015, 55(3):513-520.
- [20] 于强. 铁精矿粉高铁低硅烧结技术[J]. 山西冶金, 2006(2):41-42.
- YU Q. Sintering technology of iron concentrate powder with high iron and low silicon[J]. Shanxi Metallurgy, 2006(2):41-42.
- [21] 王荣成, 傅菊英. 高铁低硅烧结技术研究[J]. 钢铁, 2007(6):20-23.
- WANG R C, FU J Y. Study on sintering technology of low silicon in high iron[J]. Iron and Steel, 2007(6):20-23.
- [22] 何木光, 易凯, 张文德. 钒钛磁铁矿在高碱度下提铁降硅烧结性能研究[J]. 矿业工程, 2013(2):38-42.
- HE M G, YI K, ZHANG W D. Study on the sintering

- performance of vanadium titanomagnetite with high alkalinity to increase iron and decrease silicon[J]. Mining Engineering, 2013(2):38-42.
- [23] 贺淑珍, 高峰, 蔡湄夏. 高铁低硅烧结试验研究与实践[J]. 钢铁, 2004(11):12-15.
- HE S Z, GAO F, CAI M X. Experimental study and practice of low silicon sintering for high speed railway[J]. Iron and Steel, 2004(11):12-15.
- [24] 冯向鹏, 张玉柱, 李振国. 低硅条件下碱度对烧结矿强度的影响[J]. 烧结球团, 2004, 29(2):9-11.
- FENG X P, ZHANG Y Z, LI Z G. Effect of alkalinity on sinter strength under low silicon condition[J]. Sintering Pellets, 2004, 29(2):9-11.
- [25] 伍成波, 尹国亮, 程小利. 改善低硅烧结矿低温还原粉化性能的研究[J]. 钢铁, 2010, 45(4):16-19.
- WU C B, YIN G L, CHENG X L. Study on the improvement of low temperature reduction pulverization performance of low silicon sinter[J]. Iron and Steel, 2010, 45(4):16-19.
- [26] 伍成波, 程小利, 高阳. 碱度对南(京)钢低硅烧结矿低温还原粉化性能的影响[J]. 烧结球团, 2008, 033(006):14-18.
- WU C B, CHEN X L, GAO Y, et al. Effect of alkalinity on low temperature reduction and deoxidizing properties of low silicon sinter from Nanjing Steel[J]. Sintering Pellets, 2008, 033(006):14-18.
- [27] Higuchi K, Takamoto Y, Orimoto T, et al. Quality improvement of sintered ores in relation to blast furnace operation[J]. Shinnittetsu Giho, 2006, 384:33.
- [28] Fan J, Qiu G, Jiangl T, et al. studies on alternative blast furnace burden structure[c]//3rd International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. John Wiley & Sons, 2012: 59.
- [29] 刘利明. 含钛铁精矿高铁低硅烧结技术的相关研究[J]. 中文信息, 2014(4):331.
- LIU L M. Study on sintering technology of high iron and low silicon for titaniferous iron concentrate [J]. Chinese Information, 2014(4): 331.
- [30] 胡鹏, 崔庆爽, 唐文博. 白马钒钛精矿厚料层烧结技术研究[J]. 烧结球团, 2019, 44(1):13-17.
- HU P, CUI Q S, TANG W B. Research on sintering technology of thick layer of baima vanadium titanium concentrate[J]. Sintering Pellets, 2019, 44(1):13-17.
- [31] 邓秋明, 徐东良. 兴澄特钢高铁低硅烧结的生产实践[J]. 烧结球团, 2005, 30(6):30-33.
- DENG Q M, XU D L. Production practice of Xingcheng special steel high speed iron low silicon sintering[J]. Sintering Pellets, 2005, 30(6):30-33.
- [32] 张克诚, 朱德庆, 李建, 等. 高铁低硅高料层烧结研究[J]. 烧结球团, 2003(2): 1-6.
- ZHANG K C, ZHU D Q, LI J, et al. Study on sintering of high iron and low silicon and high material layer [J]. Sintering Pellets 2003(2): 1-6.
- [33] 程峥明, 宁文欣, 潘文. 超厚料层均质烧结技术的研究与应用[J]. 烧结球团, 2019(4): 6-7.
- CHENG Z M, NING W X, PAN W. Research and application of homogeneous sintering technology for ultra-thick coatings [J]. Sintering Pellets, 2019(4): 6-7.
- [34] 邹凡球, 赵改革, 梁高铭. 湘钢 360m² 烧结机 920mm 厚料层烧结生产实践 [J]. 烧结球团, 2019(3):6-9+17.
- ZOU F Q, ZHAO G G, LIANG G M. Sintering Production Practice of 920mm Thick Material Layer in 360m² Sintering Machine of Xianggang [J]. Sintering Pellets, 2019(3):6-9+17.
- [35] 白瑞国, 李燕江, 吕庆, 等. 钒钛磁铁矿分流制粒厚料层烧结工艺研究[J]. 钢铁钒钛, 2015, 36(4):65-70.
- BAI R G, LI Y J, LV Q, et al. Study on Sintering Technology of Vanadium-Titano-Magnetite Thick Layer with Split Granulation[J]. Iron and Steel Vanadium-Titanium, 2015, 36(4):65-70.
- [36] 吕庆, 刘东辉, 邹雷雷, 等. 褐铁矿配比对钒钛磁铁烧结矿性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2014, 35(5):78-82.
- LV Q, LIU D H, ZOU L L, et al. Effect of limonite ratio on properties of vanadium titanium magnet sinter[J]. Iron & Steel Vanadium and Titanium, 2014, 35(5):78-82.
- [37] 袁晓丽. 烧结优化配矿综合技术系统的研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- YUAN X L. Research on comprehensive technology system of optimized sintering ore blending [D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [38] 范晓慧, 陈许玲, 李骞, 等. 含钛铁精矿高铁低硅烧结技术[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(3):481-486.
- FAN X H, CHEN X L, LI Q, et al. Sintering technology of high-iron and low-silicon iron concentrate containing titanium[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2006, 37(3):481-486.
- [39] 刘振林, 蔡漳平. 高铁低硅烧结矿配技术的试验研究 [J]. 钢铁, 36(12): 1-5.
- LIU Z L, CAI Z P. Experimental study on blending technology of high speed iron and low silicon sinter [J]. Iron and steel, 36 (12) : 1-5.
- [40] 张大好. 基于线性规划和遗传算法的烧结配矿模型[J]. 现代冶金, 2013, 41(3):78-81.
- ZHANG D H. Sintering ore blend model based on linear programming and genetic algorithm[J]. Modern Metallurgy,

2013, 41(3):78-81.

[41] 潘开灵, 程曦, 马云峰, 等. 炼铁配矿集成配比优化模型的应用研究[J]. 武汉科技大学学报, 2009, 32(6):583-586.

PAN K L, CHENG X, MA Y F, et al. Application Research of Integrated Proportioning Optimization Model for Iron Making and Ore Blending[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2009, 32(6):583-586.

[42] 石凤丽, 郭卓团, 安胜利, 等. 蒙古矿及配矿后的烧结基础特性实验研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2012, 31(3):205-208.

SHI F L, GUO Z T, AN S L, et al. Study on the basic characteristics of sintering of Mongolian ore and its blend[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and

Technology, 2012, 31(3):205-208.

[43] 王泽琦, 郭虎林, 陈革. 基于烧结基础特性的铁矿粉优化配矿研究[J]. 包钢科技, 2014, 40(4):23-26.

WANG Z Q, WU H L, CHEN G. Study on the optimization of ore blending of iron ore powder based on the basic characteristics of sintering[J]. Baotou Steel & Technology, 2014, 40(4):23-26.

[44] 范晓慧, 姜涛, 李光辉, 等. 炼铁原料的整体优化 [C]. // 2004 年度全国烧结球团技术交流年会论文集. 2004: 4-9.

FAN X H, JIANG T, LI G H, et al. The overall optimization of iron-making raw materials [C]. // Proceedings of the Annual Meeting of National Sintering Pellet Technology Exchange in 2004. 2004: 4-9.

Development Trends of High-Silicon Low-silicon Sintering Technology

Zhi Jianming¹, Li Jie¹, Li Fei², Li Daliang², Yang Aimin¹

(1.School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei, China; 2.Shanxi Jianlong Industry Co., Ltd., Yuncheng, Shanxi, China)

Abstract: In recent years, with the continuous progress of China's blast furnace ironmaking technology, the requirements for the grade of ore into the furnace have also increased. At present, the research on high-speed and low-silicon sintering technology has become a great progress in the development of sintering technology. The application of high-speed and low-silicon sintering can further improve the quality of the furnace, and achieve the purposes of iron lifting, silicon reduction, coke reduction and pig iron cost reduction. This technology is also of great significance for improving blast furnace smelting conditions and corresponding technical and economic indicators, and the corresponding state has called for the energy saving and consumption reduction of the ironmaking process. However, with the increase of iron grade in sintered ore, the content of SiO_2 decreases, especially when the content of SiO_2 is less than 5%, the liquid phase volume decreases during the sintering process, and the problems of insufficient bonding phase are bound to affect the strength and sintered ore, production and quality. Therefore, solving these problems has become an inexhaustible motive force for the continuous innovation and development of high-speed low-silicon sintering technology. This article is mainly a summary of the current development status of high-speed low-silicon sintering technology at home and abroad, as well as corresponding solutions based on actual production problems. At the same time, some ideas for the future development of the technology are becoming intelligent.

Keywords: High iron low silicon; Sinter; Energy saving; Intelligent